

## 유벽에 갇힌 기름층의 조류중 손실에 관한 연구

송무석<sup>(1)</sup>, 현범수<sup>(2)</sup>, 서정천<sup>(3)</sup>

### Containment Failures of Oil Restricted by Vertical Plates in Current

by

Museok Song<sup>(1)</sup>, Beom-Soo Hyun<sup>(2)</sup> and Jung-Chun Suh<sup>(3)</sup>

#### 요 약

유벽에 의하여 가두어진 오일의 조류중 거동을 회류수조에서 2차원적인 실험설비를 이용하여 살펴보았다. 유벽을 적정 깊이의 수직판으로 대체하고 레이저 광원을 이용하여 오일과 물과의 경계면 변형을 2 종류의 오일 (콩기름과 경유)에 대하여 관찰하였다. 적용된 조건으로 조류의 속도는 10 cm/s - 35 cm/s, 유벽의 깊이는 4 cm 와 8 cm, 그리고 유량은 2 liter - 8 liter 의 변화를 주었다. 다양한 경계면의 거동과 조건에 따른 누유의 손실 방식을 차원해석을 통하여 정리하고 유적누유와 연속누유의 발생 메카니즘을 설명하였다.

#### Abstract

The interaction of contained oil slicks with current was investigated with a two-dimensional experimental setup in the circulating water channel facility. A vertical plate was used to contain the oils against the currents and the evolution of the oil slick, mainly focusing on the water/oil interface, was examined with an aid of a laser sheet. Two different oils - soy bean oil and diesel oil - were studied with varying the current speed (10 cm/sec to 35 cm/sec), the barrier depth (4 cm and 8 cm) and the volume of oil (2 liter to 12 liter). Different types of the interface behavior were observed according to the conditions and their mechanism was discussed based basically on the dimensional analysis. The critical speeds of two types of oil loss mechanism (entrainment failure and drainage failure) were also examined.

Keywords: 유벽(oil fence, oil boom), 유적누유(entrainment failure),  
연속누유(drainage failure), flow visualization, oil escape velocity

- 
- (1) 정회원, 홍익대학교 조선해양공학과  
(2) 정회원, 한국해양대학교 조선해양공학부  
(3) 정회원, 서울대학교 조선해양공학과

## 1. 서 언

균일한 유동장 내에서 격벽에 의해서 가두어진 기름층의 거동에 관한 연구는 해상에서 유조선이나 해양구조물의 파손에 의한 기름유출사고시 유출된 기름을 유벽(Oil Fence)으로 가두고자 할 때 발생하는 현상을 이해하고자 함이다. 해상환경 인자로는 파도, 조류 및 바람을 들 수 있으며 그밖에 기름의 양, 기름의 물성, 유벽의 깊이 등이 기름층의 거동에 영향을 준다. 통상 가벼운 경질유의 경우 비교적 단시간 내에 증발하여 없어지나 국내에서의 사고사례가 많은 원유나 벙커 C유 등은 시간이 경과하여도 많은 양이 증발하지 않고 해상에 남아서 풍화작용에 의하여 변질됨과 더불어 이동, 확산하며 넓은 해안선을 오염시킨다.

기름과 해수의 경계면 유동은 두 액체간의 밀도차, 중력, 조류속도 및 표면장력 등의 변수에 의해서 지배된다. 여기서 관심이 있는 것은 유벽(Oil Fence)으로 가두고자 하는 기름층이 어떠한 상태 하에서 기름포획능력을 상실하는 지에 관한 것으로서, 유벽 아래로 기름이 빠져나가는 현상은 일반적으로 다음의 세 경우로 나누어 고려하고 있다. (Fig. 1 참조)

(1) 연속누유 (Drainage Failure) : 기름층이 유벽근처에서 조류속도가 증가함에 따라 어느 정도 이상 두꺼워지면 유벽 근처에서 기름이 빠져나가기 시작하는데 이를 연속누유라 한다. 넓은 영역에 걸쳐 정압력과 마찰력으로 균형을 이루어 형성된 기름과 물의 경계면이 유벽 근처에서 유벽에 의하여 증가된 상대유속에 의한 흡인력(동압력)을 이기지 못하고 누유가 일어난다. 기름이 빠져나가는 최저 속도를 임계속도라 할 때 임계속도는 유벽이 깊어짐에 따라 증가하기 때문에 유벽설계시 유벽의 깊이를 결정하는 요인이 될 수 있다.

(2) 유적누유 (Entrainment Failure) : 유적누유는 기름과 물의 경계면에서 동압력과 정압력이 균형을 이루어 기름층의 전단에 형성되는 headwave 형상과 관계되는 경우가 많다. 기름층과 물의 경계면에서 유속이 증가함에 따라 경

계면의 유동장이 불안정해지고 계면파가 발생하게 되며, 임계속도 이상이 되면 headwave 정점 부근의 압력구배가 큰 부분에서 파가 부분적으로 깨지면서 기름방울 (유적, Oil Droplet)이 경계면에서 떨어져 나오게 된다. 계면파는 정상상태로 가정하기도 하나 일반적으로 임의의 파장과 주기를 가지고 움직인다. 일단 기름방울이 형성되면 기름방울의 부력과 표면장력의 영향을 무시할 수 없게 된다. 통상 연속누유보다 낮은 속도에서 발생하며 유벽의 깊이에 거의 무관하게 일어나는 현상이기 때문에 해상에 기름을 가두는데 문제를 야기하는 현상이다.

(3) 축적한계누유 (Failure by Critical Accumulation) : 점성이 아주 큰 기름이나 풍화작용을 거친 기름층은 유적누유나 연속누유보다 낮은 속도 (약 15 cm/s)에서 기름층이 유벽근처에서 상대유속 증가로 인한 흡인력을 견디지 못하고 기름의 물성치, 유량, 유벽의 깊이에 관계없이 완전히 빠져나간다.

Delvigne[1989]에 의하면 위와 같은 누유현상은 기름의 점도에 따라 유적누유는 점도가 400 cst 이하의 기름, 연속누유는 400 - 3000 cst 사이, 축적한계누유는 3000 cst 이상인 경우 지배적으로 나타난다고 보고되어 있다. 여기서 cst는 Centistokes의 약자로서 청수의 경우 1cst이다.

본 연구에서는 유벽에 의하여 가두어진 기름층의 거동을 실험적으로 조사하였다. 유벽은 평판으로 가정하였고 조류유동은 균일하다고 보았으며 파도에 의한 영향은 제외하였다. 사용한 기름은 경유와 콩기름으로서 점도가 비교적 낮은 것들이었다. 실험은 홍익대학교 조선해양공학과 의 회류수조를 이용하였다. 실험변수는 격벽의 깊이, 유속, 기름양이었으며 이들의 변화에 따른 기름층의 두께를 육안으로 관찰하고 비데오테잎에 녹화하여 실험이 끝난 후 원하는 기름층의 형상을 취득하였다. 회류수조 벽면에서 기름층형상을 관찰하는 것은 벽면과 기름의 표면장력, 벽면에서의 경계층 영향 등으로 인하여 부정확한 결과를 주기 때문에 계측부 중앙에 Laser Sheet를 사용하여 중앙부분을 가시화함으로써 보다 정확한 기름층 형상을 측정하였다. 계측된 기름층의 거동과 형상은 차원해석에 의하여 도출된

densimetric Froude수를 비롯한 무차원수를 사용하여 정리하였으며, 해석결과와 유동가시화 결과를 종합하여 토론했다.

## 2. 기존연구의 고찰 및 문제의 배경

유벽에 의하여 가두어진 기름층에 대한 초기의 연구는 수리학 분야에서 찾을 수 있다. Cross & Hoult[1971]는 충분히 긴 기름층의 경우 기름과 물의 경계면에서의 점성력이 기름층의 형상을 결정하는데 중요한 역할을 하며 기름층의 두께는 평판주위 층류경계층의 해석해와 유사하게 기름층 길이의 1/2승에 비례하여 증가한다고 발표하였다. Wilkinson[1972, 1973]은 기름층을 앞부분과 나머지 구간으로 나누어서, 기름층의 앞부분에 형성되는 headwave 근처인 전반부는 동압력의 영향에 지배되어 기름층 형상이 결정되고, 후반부는 Cross & Hoult[1971]의 결과와 같이 고려할 수 있다고 발표하였다. 또한, 경계면에서의 마찰계수는 길이에 관계없이 거의 일정하게 고려하여도 무방하다고 제안하였으며, 기름층 두께가 수심의 1/3에 도달하면 유벽의 깊이에 관계없이 누유가 발생한다는 기준을 설정하였다. Lau & Moir[1979]는 측정된 기름층의 형상으로부터 경계면의 마찰계수를 약산하였고 기름의 종류에 따른 마찰계수에 미치는 영향도 조사하였다. 이들의 공통점은 조류속도에 따른 유벽의 물수깊이를 결정하기 위한 목적을 가지고 있었으며 실험이나 해석결과는 수심이 얇은 하천이나 항만근처에 적용이 가능한 것이었다. Wilkinson[1973]에서는 유속의 변화에 따른 경계면의 불안정성에 대한 언급이 있었으나 근본적으로 이들의 연구는 소위 연속누유현상을 해석한 것이었다.

앞에서 언급한 바와 같이 유적누유가 연속누유 보다 먼저 일어나기 때문에 유적누유에 대한 해석이 필요하게 되었고 이러한 연구의 일환으로 Leibovich[1976]를 꼽을 수 있다. 그는 headwave 근처에서 떨어져 나오는 기름방울은 유한한 파장의 기름-물 경계파 (Interfacial Wave)가 깨어지면서 발생하며 이러한 경계파는 Kelvin-Helmholtz wave의 비선형적 증폭의 결과임을 설명하였다. 선형 Kelvin-Helmholtz 불안정성 해석으로부터 얇은 기름층은 두꺼운 기름층에 비하여 보다 안정(Stable)하다는 것과, 경계면에서 최대 국부유

속  $U_m$ 이 조류속도  $U_0$ 에 대하여 1.23 ~ 1.41배 정도가 되면 불안정한 유동이 되어 유적누유가 발생할 수 있다고 하였는데 이는 기름층의 형상과 유적누유와의 관계 해석시 유용한 지표가 될 수 있다.

Milgram & Van Houten [1978]은 유적누유현상을 해석하기 위하여 경계면에서의 동압력과 점성력의 상대적인 균형과 예측된 경계면의 형상간의 관계를 조사하였다. 해석방법으로는 주어진 기름층 형상에 대한 포텐셜 해석으로 경계면 압력분포를 계산한 후 경계면에서의 동력학적 평형방정식으로부터 마찰계수를 구하는 방법을 채택하였다. 연구결과 저속에서는 점성력이 기름층의 형상을 결정하고, 유속이 증가하면서 기름층 전반부는 점성력과 동압력이, 후반부는 점성력이 기름층 형상결정에 기여함을 보고하였다. 또한, 유속이 증가함에 따라 경계면에서 형성되는 Kelvin-Helmholtz wave의 영향을 경계면의 표면조도 증가로 인한 표면마찰계수의 증가로 보았고, 임계속도에 이르러 파가 깨어지면서 유적누유가 발생한다고 발표하였다. 그의 해석은 Lau & Moir[1978] 등의 접근방식을 개선한 것으로 볼 수 있으나, 해석결과 얻어진 마찰계수가 위치에 따라 지나치게 크게 얻어진 점으로 미루어 볼 때 경계면 형상으로부터 동압력과 점성력을 분리하여 구하는데 따른 어려움을 볼 수 있었다. 기름층의 형상을 결정하기 위한 최근의 이론적인 해석방법은 Bai & Kim[1993]에서 찾을 수 있다. 그들은 정상유동 가정 하에서 경계면 근처의 경계층내 유동은 층류점성유동으로, 그 외부는 비점성으로 가정하였는데, 물의 동점성계수를 인위적으로 증가시킴으로 실험치와 다소 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

유벽설계를 위한 정보를 얻기 위하여 유동현상에 대한 보다 포괄적인 연구는 Miller 등 [1972]의 실험에서 찾을 수 있다. 그들은 기름층 거동에 Froude수, Weber수 및 Reynolds수가 중요한 무차원수이며 따라서 모형시험을 실시할 때 이에 대한 세심한 고려가 필요함을 제안하였다. Fannelop[1983]는 기존의 실험결과를 정리하여 누유현상예측을 위한 몇 가지 한계변수를 결정하였다. 그에 따르면 경계면에서의 마찰계수를 정확히 예측하는 것이 중요하나 기름층 전반부의 headwave 근처에서는 동압력이 지배하는 영역으

로서 Froude 상사법칙으로 형상이 결정될 수 있다고 보았다. 즉, headwave의 두께는  $h_f = U_c^2 / k^2 g \Delta$ 로 구할 수 있으며 k값은 기름의 점도에 따라 1.0 ~ 1.4 사이로 주었다. 기름층의 대부분을 차지하는 중간영역에서는 점성력과 중력(정압력)의 균형으로 해석하였으며 유벽 가까이에서는 유층을 유벽 아래로 빠져나가게 하는 동압력과 기름의 부력 사이의 균형을 고려하였고 이로부터 densimetric Froude수가 지배변수임을 보였다. 유속, 수심 및 기름의 밀도로 정의된 densimetric Froude수는  $Fr_d = U_o / \sqrt{\Delta g L}$ 이며,  $U_o, L$ 은 조류속도 및 대표길이,  $\Delta = (\rho_w - \rho_o) / \rho_w$ 이다. 한편 이정목, 강관형[1998]은 차원해석과 소형 예인 수조에서의 모형시험 결과를 통하여 계면에서의 액적 생성 임계속도의 경험식을 구하였고, 관련된 연구의 심도 있는 고찰은 강관형[1996]을 참조하면 된다.

문헌조사를 통하여 간단하게 살펴본 바 실험실에서 실시할 수 있는 실험조건 하에서 누유현상은 유적누유와 연속누유로 분리할 수 있으며, 점성이 그다지 크지 않은 원유나 풍화작용이 미처 일어나기 전의 중질유 등 실험실규모의 연구에서는 유적누유가 실험에 영향을 주는 주된 현상임을 알 수 있었다. 따라서 유벽깊이의 영향은 일반적으로 그다지 중요하지 않을 것이며 누유는 기름의 종류와 조류속도에 지배되어 나타날 것이다. 바람의 영향은 보통 무시하며, 파도의 영향은 오일펜스와 기름층과의 상대운동으로 인한 누유를 고려할 때를 제외하고는 조류의 영향을 주요 인자로 보게된다. 조류는 기름층이 떠있는 국부적인 영역에서는 균일 흐름으로 가정할 수 있으며, 조류가 없더라도 방제선이 정속으로 운항하면서 기름층을 수거할 때에도 유사한 문제가 된다.

### 3. 조류중 누유거동 실험

#### 3.1 실험장치 및 방법

유벽에 가두어진 오일의 조류에 따른 거동은 홍익대학교 조선해양공학과와 회류수조를 이용하여

조사되었다. 사용된 회류수조의 크기는 계측부를 기준으로 1.5 x 0.5 x 0.4 m로서 기름을 사용하여 실험을 할 때 경험하게 되는 번거롭고 시간을 많이 소비하게 되는 과정을 비교적 줄일 수 있는 소형이다. 검증된 속도는 대략 70 cm/sec로서 본 실험을 수행하기에 충분한 속도조건을 제공하고 있다. 2차원 실험을 수행하며 제일 문제되는 것은 아마 회류수조가 특히 벽면 근처에서 균일류를 제공하지 못한다는 사실인데 본 수조의 경우 벽면에서 5 cm 가량 떨어질 경우 수조 중앙선에서의 유속이 회복됨을 검증하였다.

우선 Fig. 2는 실험장치의 배열을 보여준다. 위쪽 그림은 수조 상부에서 수면을 내려다본 것으로 하류 쪽의 검게 수조를 가로지르는 선이 기름을 막아주는 유벽 (Oil Fence 또는 Barrier)이다. 조금 길게 유벽 전면에 나타낸 면적은 기름층 (Oil Slick)을 표시하고 있고 이 기름층의 유속방향 종단면을 가시화하기 위하여 Ar-Ion laser sheet을 사용하였다. Laser sheet에 의해 가시화된 형상은 수조 측면에 고정된 still picture camera와 video camera를 통하여 기록되었다. 아래의 그림은 수조의 계측부를 측면에서 바라본 것으로 수조 상부에 still picture camera를 장치하여 오일과 물의 경계면의 형상을 shadowgraph image의 형태로 기록하기 위해 쓰였다.

실험을 조절하는 방법으로는 우선 쓰이는 오일의 점도, 비중 그리고 표면장력을 변화시키는 것과 동시에 설치되는 유벽의 깊이와 조류의 속도를 변화시키는 것을 생각할 수 있다. 본 실험에서는 시중에서 판매되는 제일제당의 콩기름과 (soy bean oil, 섭씨 10도에서 비중 0.928, 점도 99.7 cst) 유공의 경유 (kerosene, 섭씨 10도에서 비중 0.870, 점도 4.02 cst) 두 가지 기름을 유량을 변화시키며 (2리터에서 12리터) 사용하고 유벽의 깊이는 4 - 8 cm, 유속은 대략 10 - 35 cm/sec로 변화시키며 수행하였다.

유벽을 원하는 위치에 특정 깊이로 설치한 후 수조를 가동시켜 실험하고자 하는 최저 유속을 유지시킨 다음, 원하는 양의 기름을 수면위로 조금씩 흘려 올린다. 수면 위의 기름이 안정한 상태로 형상을 유지하면 수조 중앙부에서의 기름과 수면의 경계선과 수조 상부에서 관찰되는 전체적인 형상을 촬영한다. 이때 기름층의 길이 (기름층의 전단으로부터 유벽까지의 거리)도 측정하고

밀도 경계층 주위의 유동을 염료 (Laser Dye, 본 실험에서는 Rhodamine-B)를 이용하여 관찰하였다. 실험 종류에 따라 유속을 증가시키며 나타나는 현상을 계속 관찰하고 심각한 누유(Failure)가 발생하면 실험을 마친다. 일단 한 조의 실험을 마치면 수면에 남게되는 기름을 진공 펌프를 이용하여 제거하고, 표면물질(surfactant)의 영향을 (Song & Hyun, 1994 참조) 최소화하기 위하여 수면 상에 잔재하는 얇은 기름막도 최대한 제거한 후 다음 실험을 시작하였다.

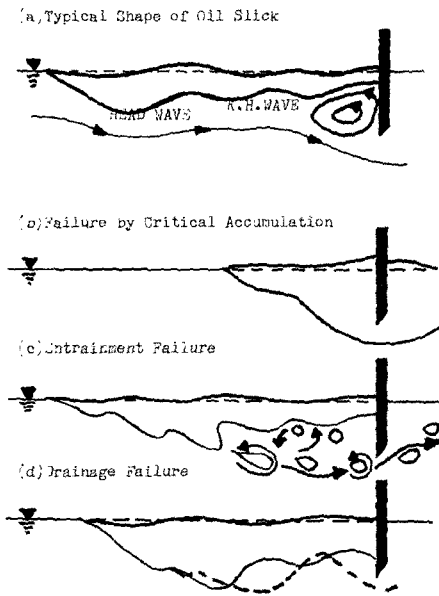


Fig. 1 Typical failure modes of contained oils in current

### 3.2 실험결과 및 고찰

Table 1은 수행된 모든 경우의 결과를 정리한 것이다. 일반적으로 기름의 양을 증가시키면 기름층의 길이가 길어지고 속도를 증가시키면 기름층의 길이는 줄어든다 누유가 발생하지 않는 상한 속도가 존재한다. 표에 검게 나타난 경우는 이러한 경향과 회류수조의 상황을 고려하여 제외된 것들이다. 또한 유벽의 깊이가 4cm로 상대적으로 작을 경우 기름의 양이 어느 정도 과다하면 (본

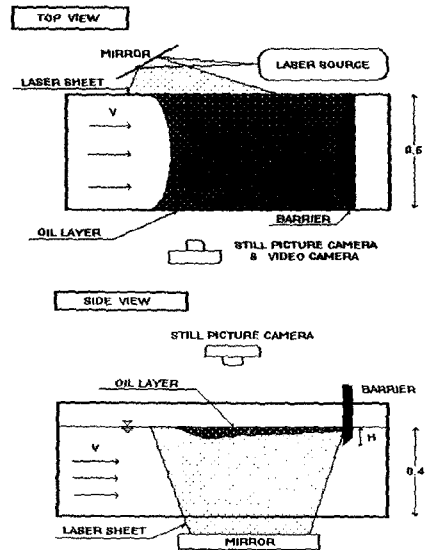


Fig. 2 Schematic arrangement of experimental apparatus

실험의 경우 8리터 이상) 낮은 속도에서 연속누유가 발생하기 쉬워 기름양이 8리터 이상인 경우는 유벽의 깊이를 8 cm로 고정하였다.

기름의 양을 일정하게 유지시키며 속도를 증가시킬 경우 (Tab. 1 참조) 관찰 되는 전형적인 현상은 기름층 길이의 감소이며, 유벽에서의 유층두께가 유벽깊이와 차이가 어느 정도 있는 한 유벽깊이의 영향은 크게 받지 않는다. Fig. 3은 앞에 언급한 변화를 잘 보여주는 그림으로서 경우 4리터를 사용하여 속도를 17 cm/s로 부터 30 cm/s 까지 증가시키며 관찰한 기름층의 형상이다. 첫 번째 그림은 전장이 88 cm인 저속에서 기름층의 특징적인 모습을 보여 주는데 건단 (leading edge)에 작게 발달된 headwave가 보이고 길이의 중앙부분이 조금 두꺼운 매우 안정된 상태이다. 속도가 20cm/s에 이르면 headwave가 커지며 그 뒤로 Kelvin-Helmholtz instability가 중력과 관성력의 균형으로 안정되게 나타나는데, 그림에 잘 나타나진 않지만 headwave 점점 근처에서 비정상 (Unsteady) 상태로 발달된 상대적으로 작은 파가 안정된 Kelvin-Helmholtz 파의 전

반부에 존재한다. 유속이 25 cm/s에 이른 다음의 그림은 매우 활발한 비정상 거동을 동반한 전체적으로 두꺼운 기름층을 보여준다. 큰 규모의 Kelvin-Helmholtz 파 위에 headwave의 비정상 거동으로 인하여 상당한 양의 비정상 파들이 더해져서 유벽까지 도달하고 있다. 속도를 30cm/s로 증가시키면 기름층 길이가 급격히 줄며 headwave 전단에서 이미 크게 발달한 비정상 파들로 인하여 headwave 끝부분이 매우 거칠어지고 이때 많은 기름방울이 기름층으로부터 떨어져 나와 하류 쪽으로 흘러가게 된다. Fig. 4는 이와 같은 기름방울 생성과정을 수면 위에서 laser sheet이 비스듬히 보이도록 하여 일종의 shadowgraph 이미지를 촬영한 것이다. 위쪽 그림은 비교적 깨끗이 발달된 headwave 상의 Kelvin-Helmholtz 파를 보여준다. (두개의 화살표로 표시된 두개의 밝은 평행선이 파정임.) 다음의 두 장의 연속 사진 중 위쪽 화살표가 가리키는 부분이 떨어져 나간 방울이 막 흘러가려는 모습을 나타낸다. 난류영향이 복합된 쇠파현상(wave breaking)으로 언급되는 이 기름방울 생성 순간의 유동을 염료를 이용하여 관찰 한 바로는, 순간 순간 나타나는 headwave 형상의 급격한 곡률이 정점 후방의 adverse pressure 영역에 역류를 발생시키고 이 보텍스는 상류의 흐름과 함께 경계면 형상을 더욱 날썹하게하여 기름방울 생성을 완성시킨다. 떨어져 나간 방울은 부력으로 인하여 다시 기름층으로 환원되거나 유벽 아래로 흘러 유실된다. 일반적으로 일단 누유가 발생하면 거의 모든 기름이 유실될 때까지 이 상황은 계속 된다.

한편 속도를 일정하게 유지시키며 기름의 양에 변화를 주면 (Tab. 1 참조) Fig. 5와 같은 거동이 관찰되는데, 이는 속도를 20cm/s로 고정시키고 공기층의 양을 10리터에서 2리터로 (그림의 위에서 아래로) 변화시키며 실험한 결과이다. 10리터를 사용한 경우 기름층의 길이는 68 cm로 비교적 큰 headwave를 타고 넘는 파와 headwave 후방의 Kelvin-Helmholtz 파가 이동하여 유벽까지 도달하고 있다. 8리터의 경우도 길이만 조금 줄어들 뿐 유사한 형태를 보이나, 6리터의 경우는 이와 조금 달리 headwave가 상대적으로 크게 나타나고 headwave 정점근처에서는

간헐적으로 기름방울이 생성되어 후류로 조금 흐르다가 다시 기름층으로 복귀하는 형태이다. 4리터의 경우는 이러한 양상이 조금 더 두드러지게 나타나며 2리터의 경우는 비교적 많은 방울들이 생성되어 거의 유벽을 빠져나가려는 상황이다. 일반적으로 headwave가 유벽에 가까워지면 유벽 근처에서의 유동이 파의 거동을 한층 불안정하게 만들고, 이에 따라 기름방울 생성가능성을 높게 한다. 또한 유벽 끝단 주위에는 상당한 가속장이 존재하고 생성된 기름방울이 부력으로 떠오르기 전에 이 영역에 도달하면 빠른 흐름에 휩쓸려 유벽 아래로 빠져나가는데, 이렇게 볼 때 유적누유(entrainment failure)의 가능성은 headwave와 유벽사이의 상대적인 위치와 밀접한 관련이 있다. 작은 유량의 경우가 일정 속도에서 많은 유량의 경우 보다 누유 가능성이 커지는 이러한 현상을 이해하자면 특정 유동장에서 headwave의 크기와 유량 (혹은 기름층의 길이)의 상관관계를 더 명확히 알아야 한다.

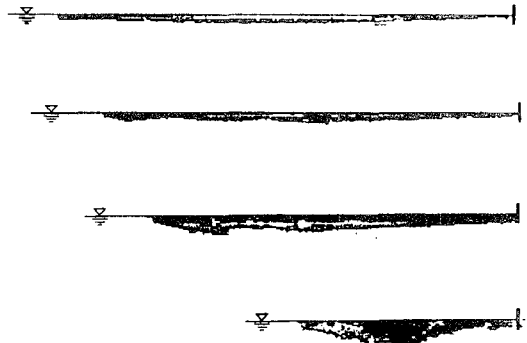


Fig. 3 Oil slick shapes with velocity variation. diesel oil. 4 liters.  $v=17, 20, 25$  &  $30$  cm/s from the top

Fig. 6은 유층 길이와 유량과의 비례관계를 살펴보기 위하여 길이측정이 가능하였던 경우의 결과를 정리한 것이다. 유층의 길이가 의미를 가지는 것은 2장에서 언급한 여러 선행 연구에서 보듯이 headwave의 두께 등의 여러 정보가 여기서 얻을 수 있기 때문이다. 한 종류의 기름을 정하고 볼 때 일정속도에서 유량을 증가시키면 길이가 늘고, 유량을 고정시키고 속도를 증가시키면 길이가 주는 앞의 두 그림 (Fig. 3 및 5)의 경향을

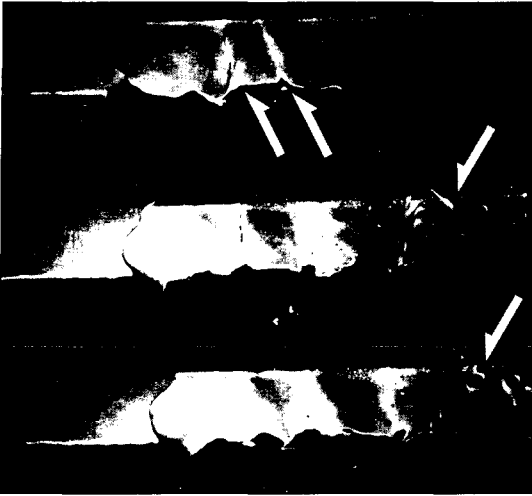


Fig. 4 Sequence of droplet formation

재확인 할 수 있다. 또한, 상대적으로 밀도차가 작고 점도가 낮은 경우의 경우 동일 유량에서 공기층에 비하여 긴 유층이 나타남을 알 수 있다. 그림에서 직선들의 기울기를 보면, 유속과 거의 무관하게 유층 길이는 단위폭당 유량 ( $Q$ ,  $m^3/m$ )의 2/3승에 비례하여 증가하는데 이는 Delvigne[1989]의 실험결과와 일치하는 것이다.

한편, 기름층의 길이를 폭당 유량의 제곱근으로 무차원 하여  $Fr_d^2$  에 대한 변화를 정리하면 Fig. 7과 같이 기름의 종류와 큰 관련이 없는 경향이 얻어진다. 이는 본 연구에서와 같이 기름량의 제한으로 인하여 Headwave가 기름층 길이의 비교적 많은 부분을 점유하고 있는 실험영역에서는 점성의 영향이 그다지 크지 않다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 그림으로부터

$L_Q \sim (Fr_d^2)^{-0.25}$ 의 관계를 얻고 이를 유층의 길이에 대하여 정리하면,  $L \sim [\Delta g Q^2 / V^2]^{1/3}$  가 되고 그림의 값을 이용하여 상수를 결정하면 일반적인 표현식인  $L = 5.31 [\Delta g Q^2 / V^2]^{1/3}$ 의 결과를 얻는다. 이는 바로 앞에서 언급한 L이 Q의 2/3승에 비례한다는 것과 일치하고, 밀도차가 클수록 그리고 속도가 느릴수록 L이 길어지는 사실을 보여준다. 앞의 식은 물론 누유가 예상되지 않는 경우에 유효한데, 공기층인 경우 유량이 충분할 때  $Fr_d$ 가 0.6 정도까지, 경유의 경우 0.4 정도까지 의미가 있었다. 실험된 모든 경우에 대

한 상세한 설명은 Tab. 1을 참조하면 된다.

실험영역 전반에 걸쳐 유적누유가 지배적으로 관찰되었으나, 유벽깊이가 4 cm인 몇몇 경우에는 연속누유가 발생하였다. 일반적으로 연속누유인 경우 유벽에서의 유층 두께와 유벽 깊이의 비가 중요한 인자이다. Robbins et al.(1971)의 결과를 근거로 길이 L인 유층의 유벽에서의 두께 ( $h_o$ )는  $h_o = 0.08(V^2/(\Delta g))^2 L^{1/2}$ 로 부터 구해질 수 있다. 실험된 경우중 누유가 관찰되지 않은 경우에 대한 이들 계산값을 Fig. 8에 보이고 있다. 계산된 값은 유벽의 깊이가 4 cm일 때

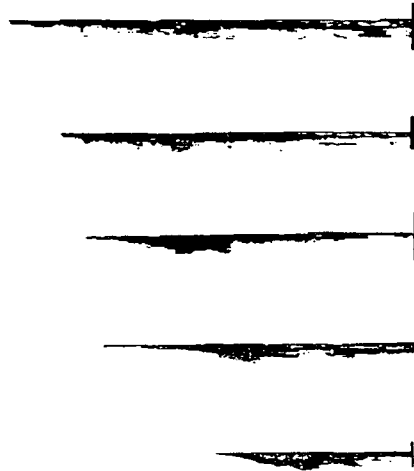


Fig. 5 Oil slick shapes with volume variation. soy bean oil.  $v=20$  cm/s. volume = 10, 8, 6, 4 & 2 liters from the top

거의 모든 경우에서, 그리고 8 cm의 경우에도 몇 경우에서 연속누유를 예측하고 있다. 이 계산식은 기름의 두께가 기름층 전단으로부터 거리의 제곱근에 비례한다는 가정에 근거한 것이나, 실제 관찰되는 기름층의 형상은 headwave를 제외할 경우 중앙부가 두껍고 유벽 쪽은 오히려 얇은 모양을 하고 있다. 이는 유벽에 의하여 근처에 형성되는 압력분포에 기인한다. 연속누유의 관점에서는 물론 유벽에서의 기름층 두께가 중요하나, 본 실험에서 관찰된 바로는 경계면을 타고 이동하는 비정상파가 유벽까지 도달하는지의 여부 또한 매우 중요하다. 유벽에 도달한 충분한

큰 파들은 유벽에서의 평균 기름층 두께보다 훨씬 깊은 유벽도 타고 넘게 되는데, Tab. 1에 보인 유량이 작은 공기층의 경우가 이에 해당한다.

끝으로, 실험결과를 정리하고 고찰하면서 Reynolds 수의 영향을 크게 고려할 필요가 없었는데, 이는 본 실험의 경우 관성력과 중력이 미치는 영향이 지대함을 반증하는 것이다.

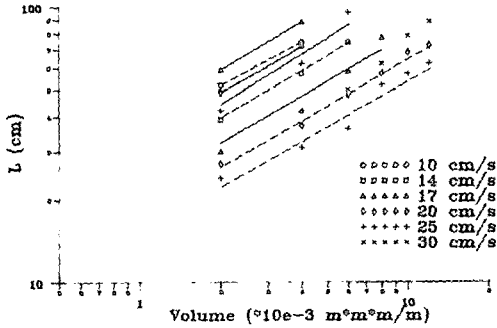


Fig. 6 Slick length (l) versus volume per unit span (q) for different velocities. dotted for soy bean. solid for kerosene

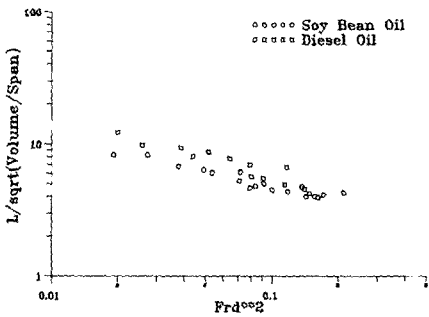


Fig. 7 Dimensionless slick length versus  $Fr_d^2$

표면장력의 경우는 현재 이에 대한 정보를 알지 못하기도 하지만, 표면장력이 의미가 있는 곡물의 크기를 감안할 때 일단 무시하여도 큰 영향이 없을 것으로 판단하였다. 실험 결과를 정리하며 headwave 후반의 거동에 있어서의 점성의 영향은 고려되어야 한다고 믿고 diffusion time scale과 중력에 의한 advection time scale의 비

로 정의되는  $\Pi_1 (\equiv (\Delta g)^{0.5} L^{1.5} / \nu)$  이라는 무차원수를 도입하여 자연적으로 얻어지는 또 하나의 무차원수  $\Pi_2 (\equiv U^3 / (\nu \Delta g) = Re Fr^2)$ 와의 관계를 살펴보았으나 (Fig. 9 참조) 현재로는 유의한 정보를 파악하지 못하였다. 추후 이에 대한 이해와 좀 더 체계적인 고찰이 필요할 것이다.

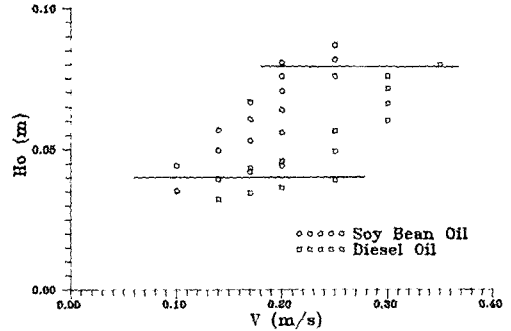


Fig. 8 Calculated oil thickness at the fence according to Robbins et al. [1971]

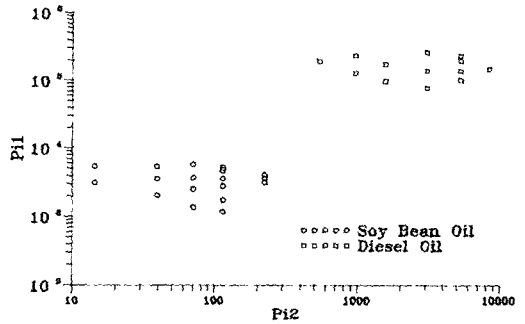


Fig. 9  $\Pi_1$  vs  $\Pi_2$

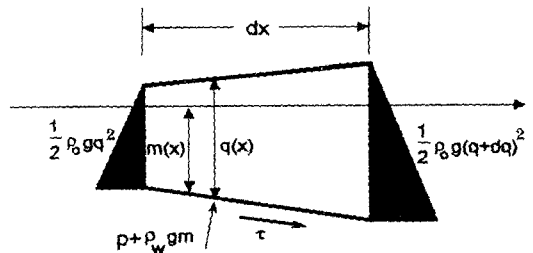


Fig. 10 Force equilibrium diagram



#### 4. 정상유동 해석에 관한 소고

본 절에서는 정상유동 가정 하에서 기름층의 형상과 유체력간의 관계를 고려한 과거의 연구를 간단히 고찰하고자 한다.

Fig. 10에 주어진 기름층의 미소구간에 대한 힘의 평형으로부터 기름과 물의 경계면에서의 평형방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$\left( \frac{2}{Fr_d^2} m' + \Delta C_p \right) \left( \frac{dm'}{dx'} + \frac{Fr_d^2}{2} \frac{dC_p}{dx'} \right) = \Delta(1 - \Delta) C_f \quad (1)$$

여기서  $m'$ ,  $C_p$ ,  $C_f$ 는 정수면 하 기름층의 두께, 경계면의 압력 및 마찰계수이다. 이식은 Bai & Kim [1993]의 기본방정식을 아래의 무차원수를 사용하여 정리한 것이고 각 무차원수는

$$m' = \frac{m}{L}, \quad x' = \frac{x}{L},$$

$$C_p = \frac{p}{1/2\rho U_o^2}, \quad C_f = \frac{\tau}{1/2\rho U_o^2},$$

$$Fr_d = \frac{U_o}{\sqrt{\Delta g L}}$$

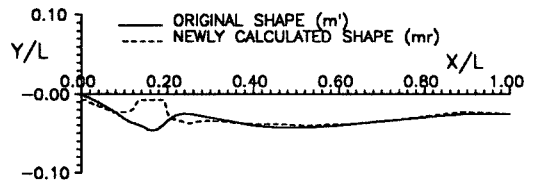
로 정의되고 L은 기름층의 길이이다.

압력계수  $C_p$ 는 비점성 정상유동으로 가정하여 Suh [1990]의 Panel Method를 이용하여 계산한 후, 주어진 기름층의 형상에 대한 식(1)로부터 마찰계수를 구하였다. 한편, Milgram & Van Houten [1978]에서와 같이 동압력에 의한 성분을 제외하고 위의 평형방정식을 적분하면 다음과 같이 마찰계수만에 의하여 생성되는 기름층의 두께 ( $m_r$ )를 구할 수 있다.

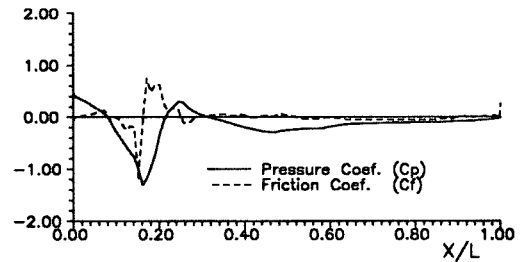
$$m_r(x') = Fr_d \left[ (1 - \Delta) \int_0^{x'} C_f(x) dx \right]^{1/2} \quad (2)$$

Fig. 11에는 유속 17cm/s에서 콩기름 8리터를 수조에 주입한 경우에 대한 해석 예를 보여주고 있다. Fig. 11(a)에 기름층의 모양이 실선으로 주어져 있으며, Fig. 11(b)에는 이 형상에 대하여 포텐셜해석으로 계산한 압력분포와 식(1)로 구해진 마찰계수가 나타나 있다. 압력분포를 보면 headwave 근처에서 동압력이 매우 크게 나타나

고 있음을 알 수 있는데, 이를 국부최대유속으로 보면 조류속도의 약 1.5배에 해당한다. 유동이 안정되기 위하여는 국부경계면의 최대유속을 Leibovich[1976]에 따라 구해 보면 우리의 경우 13-18cm/s가 얻어지는 바, 따라서 그림에서 보인 경우의 국부 유속은 Leibovich[1976]의 조건에 비추어 볼 때 Kelvin-Helmholtz wave의 발생이 예견되며, 실제로 저속에서도 미세하나마 이러한 파가 존재함을 관찰한 바 있다. 즉, 본 연구에서 행한 거의 대부분의 실험영역에서는 headwave 정점 근처에서 형성된 큰 부분적인 속도의 상승이 불안정한 계면파의 발생을 위한 에너지로 변환되면서 정상유동을 유지하지 못하게 만드는 듯 하였다. 따라서 정상유동 가정 하에서 구해진 마찰계수 값은 동압력이 과도하게 예측될 경우 평형



(a) Oil Slick Profiles



(b) Estimated Pressure and Friction Coefficients

Fig. 11 Typical example of estimated forces and slick shape (soy bean, 17cm/s, 8 liters)

방정식을 만족하기 위하여 Fig. 11(b)에서와 같이 크게 얻어질 수밖에 없으며 일종의 해석상 오차가 마찰계수의 증가로 흡수된 것으로 볼 수 있다. Fig. 11(a)에 식(2)를 이용하여 계산한 새로운 기름층 형상 ( $m_r$ )에서도 기름층 형상에 미치는 압력의 영향이 과도하게 나타남을 볼 수 있었다. 유동가시화 결과에 따르면 Kelvin-Helmholtz wave의 파장과 주기는 보통 headwave 두께에

유벽에 갇힌 기름층의 조류중 손실에 관한 연구

Table 1 Soy bean oil : kinematic viscosity = 99.7 cst, specific weight = 0.928, at 10 degree Celcius.  
 kerosene : kinematic viscosity = 4.02 cst, specific weight = 0.870, at 10 degree Celcius.  
 V:current speed in cm/s, H:barrier depth in cm, Lxx:slick length xx cm, HW:headwave, KH:waves due to Kelvin Helmholtz instability, LE:leading edge of the slick, B:barrier, DR:drop, ENF:entrainment failure, DRF:drainage failure, ENFR:some entrainment failure & some reenter, HWE:end of the head wave, W:smaller waves or small scale KH over riding bigger stable KH, TH:thick, sm:small, md:mid location of the slick, mv:moving or traveling, bh:behind, fr:from, ht:hit or reach, lt:small amount, al:almost or nearly, wk:weak, st:stagnant or shape is fixed, wd:wild or active, ov:over, bg:large, cl:clean, sb:stable, rsb:relatively stable, ls:generated less

V	H	2 liter		4 liter		6 liter		8 liter		10 liter		12 liter	
		soy bean	diesel	soy bean	diesel	soybean	diesel	soy bean	diesel	soybean	diesel	soy bean	diesel
10	4	L48, smHW		L73, smHW									
	cm	alF, mdTH		alF									
/s	8	L52, smHW		L74, smHW									
		alF, mdTH		alF, mdTH									
14	4	L39 mvKH KHbhHW	L71, smHW alF, wkKH	L58 mvKH KHbhHW		L70 mvKH KHbhHW							
	8	L39 mvKH KHbhHW	L77, smHW alF, wkKH	L57, mvKH KHbhHW		L74 smHW alF							
17	4	L30 mvKH KHfrLE	L56, stKH KHbhHW	L42 KHhtB KHfrLE	L87, clHW stKH	L51 KHhtB KHfrLE							
	8	L30 mvKH KHfrLE	L59, stKH KHbhHW	L45 KHhtB KHfrLE	L88, stKH stKH	L58 KHfrLE		L77, smHW mvKH, alF					
20	4	L26 KHhtB KHfrLE	L45, bgHW smWovKH	L37, wd KHhtB KHfrLE	L68, clHW stKH	DRfrHWE DRF							
	8	L27 ltDR KHfrLE	L49, bgHW smWovKH	L35 ltDR KHfrLE	L72, clHW stKH, smW	L48 KHhtB ltDR REN		L57 bgHW KHfrLE		L68 bgHW KHfrLE		L72, bgHW KHfrLE sb	
25	4	DRfrHWE ENF	L37, bgHW wd	DRfrHWE ltENF&DRF	L58, wd smWovKH	L95, wd mvWovKH							
	8	L24 ENFR DRfrHWE	L42, bgHW wd	ENF	L62, wd smWovKH	ENF	L95, wd smWovKH	L52, bgHW DRfrHWE		L57 bgHW DRfrHWE		L62 ltENF DRfrHWE	
30	4		ENF	DRF	ENF&DRF	L44 ENFR DRfrHWE							
	8	ENF	ENF		ENF	L50, wd DRfrHWE		L62, wd DRfrHWE		L78, rsb lsDR		ENF lsDR	L88, rsb lsDR
35	4					DRF							
	8					ENF							ENF

상응하는 order를 가지고 비교적 규칙적인 주기성을 보였기 때문에 이를 경계면에서의 마찰저항 계수의 증가에 해당하는 Reynolds stress로 고려하는 것은 물리적으로 문제점이 있는 것으로 보인다. 그러므로 본 문제는 계면파의 안정성에 대한 연구로부터 해결되어야 하며, 만일 Navier Stokes 방정식을 이용한 해석이 요구될 시에는 Reynolds 방정식보다는 triple decomposition에 의한 방정식을 사용해야 할 것으로 여겨진다.

## 5. 결 언

본 연구에서는 유벽에 의하여 구속된 기름의 조류중에서의 거동을 회류수조를 이용한 2차원적 실험으로 살펴보았다. 그 결론과 제안사항을 간추려 보면 다음과 같다.

- (1) 일반적으로 유속이 증가하거나 유량이 줄면 유층의 길이는 감소하며, 기름층의 길이는 단위 폭 당 유량의 2/3승에 비례하였다.
- (2) 경유에 비해 비정상 Kelvin-Helmholtz 파의 진폭과 주기가 상대적으로 크고 주기적으로 발생하는 콩기름의 경우, 비정상파가 유벽에까지 이동하여 유벽의 누유차단효과를 평균치보다 감소시켰다. 따라서 유벽의 깊이가 상대적으로 작을 경우 콩기름이 점도와 밀도가 낮은 경유에 비하여 연속누유의 가능성이 높았다.
- (3) 기름방울의 생성은 headwave의 활발한 거동과 그에 따른 압력변화, 유동변화 등에 기인하며, 유량과 속도변화에 따른 유벽과 headwave 사이의 거리에 따라 변화하였다.
- (4) 유벽의 깊이가 어느 정도 충분하면 주로 유적누유에 의하여 누유가 발생하였다. 이로부터 실험실 규모의 실험에서는 점도가 매우 높은 중질유(Heavy Oil)나 풍화작용이 된 기름을 사용하지 않는 한 유적누유가 지배적으로 일어나며, densimetric Froude 수가 지배하는 유동임을 알 수 있었다.
- (5) 간단한 정상유동 해석으로부터 본 실험의 경계면 유동을 정상유동으로 가정하여 해석하는 것은 다소 무리가 있음을 짐작할 수 있었다. 즉, 일반적으로 headwave는 주위의 높은 압력구배에 의하여 자신의 형상을 유지하지 못하고 파로 전파되어 나가는 것으로 이해되었다.

(6) 추후의 연구과제로서는 Reynolds number (점성)의 영향 및 계면파의 거동과 불안정 특성에 대한 연구가 필요 할 것으로 생각되었다.

## 참고문헌

- [1] 강관형, 1996, 표면 오염층의 운동과 수용에 관한 이론 및 실험적 연구, Ph.D. thesis, 포항공과대학교
- [2] 이정목, 강관형, 1998, "조류와 파랑중에서의 유벽의 보유성능 해석", 한국해양환경공학회지, Vol.1, No.1, 29-38.
- [3] Bai, K.J. and Kim, J.W., 1993, "A Computational Model for the Flow Around an Oil Boom", Workshop on Tidal & Oil-Spill Modeling, WTOM '93, Advanced Fluids Engr. Res. Center, POSTECH, Oct. 4-5.
- [4] Cross, R.H. & Hoult, D.P., 1971, "Collection of Oil Slicks", J. Waterways, Harbours and Coastal Engr. Div., ASCE, Vol.97, No.WW2, Paper 8122, May.
- [5] Delvigne, G.A.R., 1989, "Barrier Failure by Critical Accumulation of Viscous Oil", Proc. 1989 Oil Spill Conf.
- [6] Fannelop, T.K., 1983, "Loss Rates and Operational Limits for Booms Used as Oil Barriers", Applied Ocean Research, Vol.5, No.2.
- [7] Lau, Y.L. & Moir, J., 1979, "Booms Used for Oil Slick Control", J. Environmental Eng Div., ASCE, Vol.105, EE2, 1973.
- [8] Leibovich, S., 1976, "Oil Slick Instability and the Entrainment Failure of Oil Containment Booms", J. Fluids Engineering, Vol.98, March.
- [9] Milgram, J.H. & Van Houten, R.J., 1978, "Mechanics of a Restrained Layer of Floating Oil above a Water Current", J. Hydronautics, Vol.12, No.3, July.
- [10] Miller, E.R., Lindenmuth, W.T., Lehr, W.E. & Abrahams, R.N., 1972, "Experimental Procedures Used in the Development of Oil Retention Boom Designs", Marine Technology, Vol.9,
- [11] Robbins, R.J., Hoult, D. & Cross, R., 1971, "Steady-State Profile for the Oil Barriers", J.

Waterways, Harbors and Coastal Engr., ASCE, Vol.97, WW1.

[12] Song, M. & Hyun, B.S., 1994, "A numerical Investigation of the Interaction of Spilt Oil with Two-Dimensional Subsurface Flow", ISOPE '94, Osaka, Japan, April.

[13] Suh, J.C., 1990, "Unsteady Analysis for a Two-Dimensional Foil in Uniformly Sheared Onset Flow", Ph.D Thesis, Dept of Naval Arch. & Marine Engr, U. of Michigan, Ann Arbor.

[14] Wilkinson, D.L., 1972, "Dynamics of Contained Oil Slick", J. Hydraulics Div., ASCE, Vol.98, Paper 8950, HY6, June.

[15] Wilkinson, D.L., 1973, "Limitations to Length of Contained Oil Slicks", J. Hydraulics Div., ASCE, Vol.99, Paper 9711, HY5, May.